



Las tonalitas ocelares del Batolito de la Sierra Norte de Sevilla. Implicaciones en mezclas de magmas

The ocellar tonalites from the Northern Seville Range Batholith. Implications in magma mixing

DE LA ROSA, J. D. & CASTRO, A.

El Batolito de la Sierra Norte de Sevilla se caracteriza por la presencia de cuerpos kilométricos alternantes de composición gabro-diorítica y granítica, siendo frecuente la existencia en los contactos entre ambos de zonas de interacción simplutónica. En el interior de las zonas de interacción magmática afloran rocas tonalíticas con ocelos de composición granítica.

Las relaciones de campo (forma, tamaño y distribución de los ocelos) y la petrografía de las tonalitas ocelares de una de las zonas de interacción (Macizo de Genera) sugieren que estas rocas han sufrido un proceso de mezcla («mingling») por captura de «gotas» de líquido granítico por un magma máfico. Por otra parte, la composición química de las tonalitas ocelares presenta un empobrecimiento en elementos L.I.L y enriquecimientos en elementos refractarios en relación con el resto de las tonalitas sin ocelos que afloran en la zona de interacción. Esto sugiere que el proceso de interacción se produjo en un estadio precoz donde las condiciones de flujo y el sobrecalentamiento del magma félsico facilitaron la mezcla.

El enfriamiento rápido del magma máfico con los ocelos graníticos ha permitido que se haya preservado la textura ocelar. Sin embargo, en ambientes plutónicos más profundos, el enfriamiento lento de la tonalita favorecería la mezcla completa de ambos líquidos desapareciendo la textura ocelar. Este mecanismo puede contribuir a la hibridación de magmas básicos a mayor escala.

Palabras clave: Tonalitas ocelares, Granitoides, Zonas de Mezcla Magmática, Hercínico Zona Surportuguesa, Batolito de la Sierra Norte de Sevilla.

The Northern Seville Range batholith is characterized by the alternance of gabbro-dioritic and granitic kilometric bands. The existence of synplutonic interaction zones is very frequent at the contacts. Tonalitic rocks with granitic ocelli appear inside these magmatic interaction zones.

Field relationships (shape, size and ocelli distribution) and petrography of the ocellar tonalites in one of the interaction zones (Genera massif) suggest that these rocks have undergone a mingling process by capture of granitic-liquid drops.

Apart from this, the chemistry of the ocellar tonalites displays a depletion in L.I.L. elements and an enrichment in refractory elements compared with other ocelli-free tonalites appearing in the same interaction zone. All this suggests that the process of interaction took place in an early stage at which special conditions of upperheating and turbulent flow of the felsic magma favoured the mingling. The rapid cooling of the ocelli-bearing mafic magma contributed to the ocellar texture to be preserved. However, in deeper plutonic environments the subsequent slow cooling of the tonalite would favour the complete mixing of both magmas destroying the ocellar texture. This mechanism can contribute to the complete hybridization of basic magmas on a greater scale.

Key words: Ocellar Tonalites, Granitoids, Magmatic Mixing Zone, Hercynian, South Portuguese Zone, Northern Seville Range batholith.

DE LA ROTA, J. D. & CASTRO, A. (Departamento de Geología y Minería. Universidad de Sevilla. 21819 La Rábida (Huelva). Spain).

INTRODUCCION

Las rocas ocelares se caracterizan por contener cuerpos leucocráticos redondeados (ocelos) englobados por una matriz oscura de composición química distinta. Un ejemplo son los basaltos ricos en Fe con ocelos de composición granítica (ROEDDER, 1978), y rocas máficas de tamaño de grano muy fino conteniendo ocelos de feldespato potásico, nefelina, analcima o cuarzo (PHILPOTTS, 1976). Otro tipo consiste en rocas máficas con cuarzo ovoide rodeados por una corona de anfíbol (ANGUS, 1962; PHILLIPS, 1963), las cuales han sido interpretadas como el resultado de transformaciones metasomáticas sufridas por xenolitos basálticos en un magma granodiorítico (ANGUS, 1962). Rocas de características petrográficas similares a estas últimas han sido consideradas recientemente originadas por mezcla de magmas de diferentes composiciones, siendo los fenocristales de cuarzo centros de nucleación heterogénea de anfíbol en el magma máfico (VERNON, 1983, CANTAGREL *et al.*, 1984), incorporados probablemente a éste por un mecanismo de mezcla por inyección («injection mixing»; CASTRO *et al.*, 1990 a).

Procesos de inmiscibilidad magmática han sido invocados fundamentalmente para explicar el origen de las rocas ocelares (ROEDDER, 1978). Según esto, durante la cristalización de un magma se separarían dos fases líquidas químicamente diferentes, provocando la individualización de pequeños cuerpos (ocelos) en una matriz generalmente más oscura.

Sin embargo no todas las rocas ocelares poseen el mismo origen. Por ejemplo, existen autores que proponen la mezcla incompleta de magmas dioríticos y granodioríticos en lugar de un posible origen por inmiscibilidad magmática (rocas ocelares de la Super Unidad de Puscao en el Batolito Costero del Perú; BUSSELL, 1985, 1988; comunicación personal 1989).

Situación Geológica

El batolito de la Sierra Norte de Sevilla (BSNS) (Fig. 1) está constituido por cuerpos kilométricos alternantes de composición gabbro-diorítica, tonalítica y granítica.

En el interior de los gabros y dioritas afloran cuerpos de rocas ultrabásicas con texturas acumuladas, siendo los minerales cúmulus esenciales olivino, plagioclasa y es-

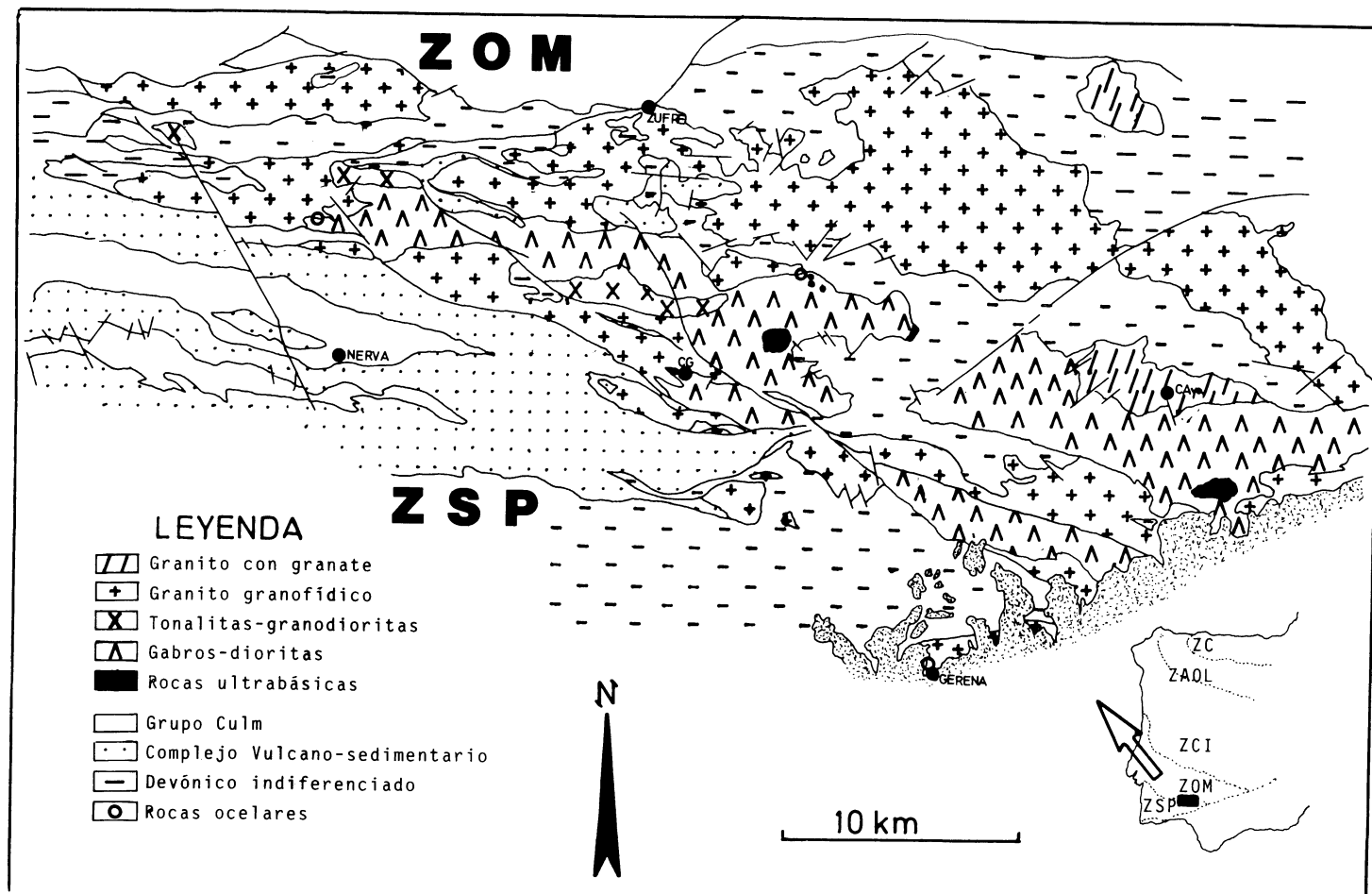


Fig. 1. Esquema geológico del batolito de la Sierra Norte de Sevilla donde se han señalado los afloramientos donde existen tonalita con ocelos. ZC: Zona Cantábrica. ZAOL: Zona Asturoccidental Leonesa. ZCI: Zona Centro-Ibérica. ZOM: Zona de Ossa-Morena. ZSP: Zona Surportuguesa.

pinela verde. Los distintos porcentajes de porosidad residual (CAMPBELL, 1987) indican que los procesos de cristalización fraccionada de olivino y plagioclasa tuvieron gran importancia en la petrogénesis de la roca del batolito (DE LA ROSA & CASTRO, 1990 a). En los contactos entre la roca básica y el granito existen zonas de interacción magmática donde afloran las tonalitas ocelares.

En este trabajo se hace un estudio petrológico detallado de las tonalitas ocelares que afloran en una de las zonas de mezcla del BSNS (zona de mezcla magmática del Macizo de Gerena (CASTRO *et al.*, 1990 b; DE LA ROSA & CASTRO, 1990 b), con el que se pretende conocer las características petrológicas y químicas, y discutir un posible origen para este tipo de rocas. Aunque en las zonas de mezcla magmática existentes en el BSNS afloran rocas ocelares de características parecidas a las descritas por ANGUS (1962) y PHILLIPS (1963), en este trabajo solamente se hará referencia a tonalitas con ocelos sin corona de anfíbol. Los cuerpos ocelares con corona de anfíbol se consideran material sólido incorporado al magma máfico como xenocristales o microxenolitos (CASTRO *et al.*, 1990 a).

RELACIONES DE CAMPO

En la Fig. 1 se puede observar un esquema geológico del BSNS en el que se han señalado las zonas de interacción magmática con rocas ocelares.

La figura 2 muestra un perfil vertical de una de las zonas de interacción (Macizo de Gerena), donde se han distinguido distintos tipos de cuerpos máficos resultantes de la interacción magmática. La parte inferior del perfil está constituida por grandes masas de roca híbrida homogénea con enclaves, schlieren y bandas más o menos félsicas. La composición de la roca híbrida es tonalítica a granodiorítica y posee una gran heterogeneidad textural consistente en la presencia

de porciones milimétricas de roca con textura subofítica de tamaño de grano muy fino, rodeadas por roca con textura hipidiomórfica de grano medio. Los minerales esenciales de la roca híbrida son plagioclasa, cuarzo, biotita, anfíbol y feldespato potásico. Hay que resaltar la zonación compleja que poseen las plagioclasas de las rocas híbridas, similar a la descrita en magmas calcoalcalinos por NIXON & PEARCE (1987).

En la zona media (Fig. 2) aflora un dique simplutónico de composición tonalítica con un borde frío y crenulado en la parte inferior. La textura es subofítica, y está compuesto por plagioclasa zonada (núcleo An₅₅, borde An₃₅₋₃₀), anfíbol (Mg-hornblendas según la clasificación de LEAKE (1978) (CASTRO *et al.*, 1990 b), cuarzo y biotita. El dique se encuentra roto, originando roca híbrida en contacto gradual con el granito encajante.

Las tonalitas ocelares afloran en la parte superior del perfil, de manera parecida a lo observado en otros afloramientos de la zona de mezcla.

Los cuerpos que contienen la tonalita con ocelos poseen tamaños que varían desde varios centímetros hasta un metro, y son fragmentos de forma subredondeada a alargada, aunque también se ha observado la presencia de tonalitas ocelares en diques simplutónicos. En los fragmentos se observa la presencia de un borde frío digitado que rodea total o parcialmente al cuerpo.

FORMA Y DISTRIBUCION DE LOS OCELOS

Las rocas ocelares están constituidas por una matriz tonalítica que engloba a diversos tipos de ocelos de composición granítica. Se han distinguido cuatro tipos de ocelos cuyas características mesoscópicas y petrográficas se encuentran resumidas en la Tabla 1.

Los ocelos redondeados (Fig. 3a) son uniformes y llegan a alcanzar varios milímetros de tamaño. Están rodeados por una ma-

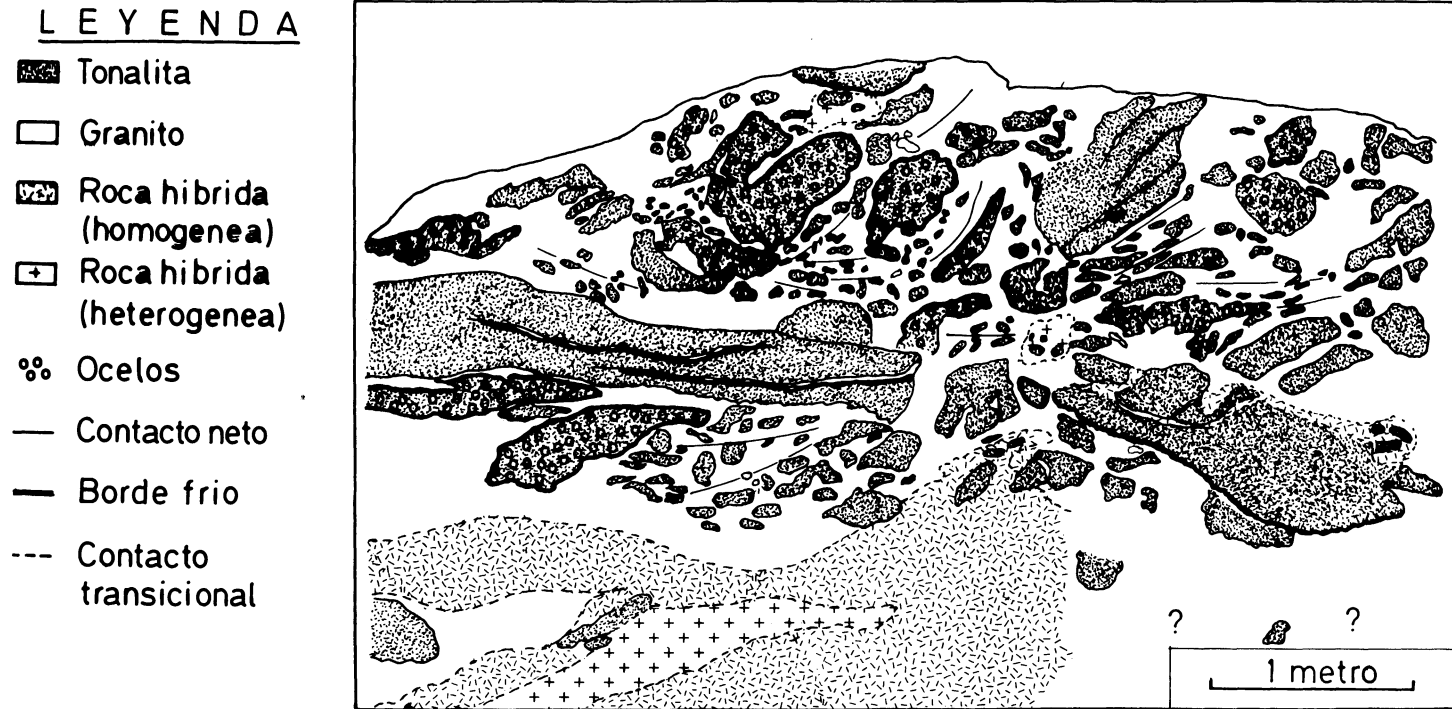


Fig. 2. Esquema geológico de un frente vertical de una zona de interacción magmática situada al sur del Macizo de Gerena (Sevilla).

FORMA	Redondeada	Elipsoidal	Lobulada	Irregular
TAMAÑO	1-4 mm	1 mm a 3 cm	1 a 5cm	1 a 10cm
ESTRUCTURA	Concéntrica	Concéntrica	Concéntrica a homogénea	
ROCA ENCAJANTE	Q-diorita	Q-diorita	Q-diorita a tonalita	
TAMAÑO DE GRANO DE LA ROCA ENCAJANTE	Muy fino a fino	Muy fino a fino	Muy fino a fino	Fino a medio
COMPOSICION MINERALOGICA DE LOS OCELOS				
Cuarzo	>50%	>50%	>50%	50-20 %
Fd k	50-20 %	50-20 %	50-20 %	50-20%
Biotita	Ocasional	Ocasional	50-20 %	< 20%
Otros	Ep-Op	Ep-Op	Ep-Op-Sph	Ep-Op-Sph

TABLA 1. Resumen de las características mesoscópicas de los tipos de ocelos.

triz de composición tonalítica de tamaño de grano muy fino, siendo los contactos entre el ocelo y la matriz encajante de tipo neto. Los ocelos de este tipo se encuentran zonados con el núcleo constituido por cuarzo \pm biotita, y el borde por cuarzo \pm feldespato potásico. También pueden aparecer en menor proporción epidota, clorita, opaco y esfena.

Los ocelos elipsoidales (Fig. 3b) poseen características comunes a los ocelos redondeados: por ejemplo el tamaño, mineralogía, tamaño de grano de la matriz encajante y distribución concéntrica de los minerales en el interior del ocelo. Se ha observado en un dique la existencia de pequeños enclaves elongados de tamaño de grano fino (inclusiones cogenéticas del borde del dique) y ocelos elipsoidales alineados paralelos a las paredes del dique. Según esta observación la forma elipsoidal de los ocelos es debida al flujo existente en el interior del magma máfico una vez originados los ocelos.

Los ocelos lobulados (Fig. 3c) son de mayor tamaño que los ocelos redondeados y elipsoidales y existe una tendencia a la distribución concéntrica de los minerales en el ocelo. La composición mineralógica es muy parecida también a los anteriores.

Los ocelos irregulares (Fig. 3d) pueden llegar a medir varios centímetros de tamaño. La textura del ocelo es hipidiomórfica de tamaño de grano medio, estando incluidos en una tonalita de tamaño de grano fino.

En un mismo fragmento se observa una zonación del tamaño y forma de los ocelos. De esta manera existen fragmentos con ocelos redondeados de varios mm cercanos al borde frío y elipsoidales a irregulares de tamaño centimétrico en el núcleo (Fig. 3b).

PETROGRAFIA DE LAS TONALITAS OCELARES

La matriz de la tonalita con ocelos es muy similar a la tonalita sin ocelos que aparece en la zona de mezcla magmática (DE LA ROSA & CASTRO 1990 b, CASTRO *et al.*, 1990 b).

La textura de la matriz es hipidiomórfica con tendencia subofítica de tamaño de grano fino a medio. Está constituida por plagioclasa, anfíbol, cuarzo \pm biotita. Minerales accesorios son apatito acicular, esfena, circón, feldespato potásico y opacos.

La plagioclasa es subhedral de tamaño

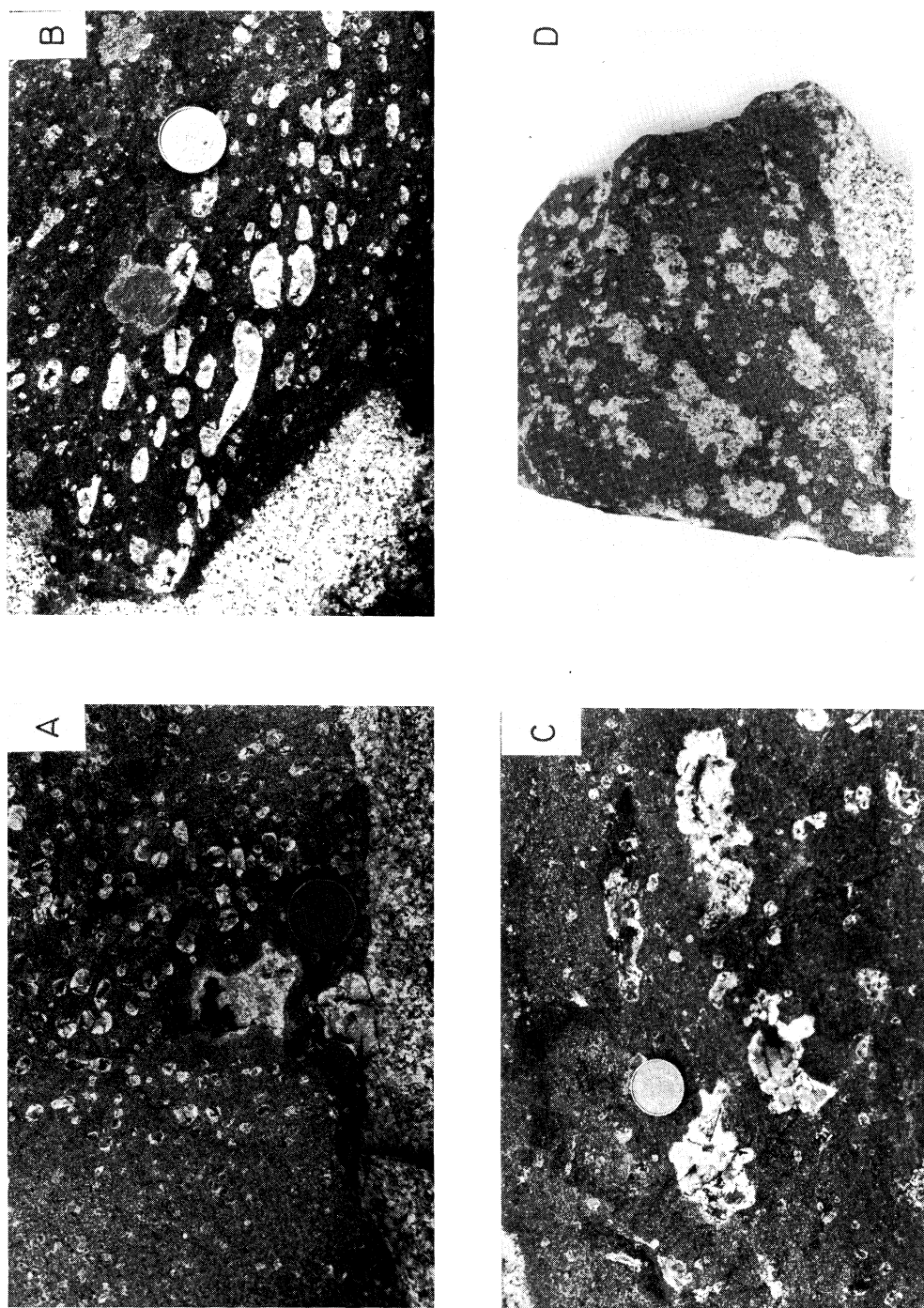


Fig. 3. Tipos de ocelos: (a) Ocelos redondeados, (b) Ocelos elipsoidales, (c) Ocelos lobulados, y (d) Ocelos irregulares.

de grano fino y se encuentra zonada con núcleo de composición An50-35 y borde An25-20. En el borde pueden existir inclusiones de apatito.

El anfíbol es subhedral de tamaño de grano fino con pleocroísmo verde-amarillento. Se encuentra zonado con un núcleo de coloración más oscura. También en el núcleo existen restos de clinopiroxeno incoloro, siendo éstos probablemente el resultado de una transformación magmática incompleta del clinopiroxeno a anfíbol. Contiene inclusiones anhedralas de minerales opacos. Otro tipo de anfíbol constituye agregados pseudoprismáticos de cristales anhedralas con características ópticas similares a los anfíboles de la matriz descritos antes.

El cuarzo es anhedral-poiquilitico, ocupando los huecos dejados por plagioclasa y anfíbol fundamentalmente.

La biotita es subhedral de tamaño de grano fino con pleocroísmo marrón-amarillento y aparece sobre todo en las tonalitas con altos porcentajes de ocelos.

Los minerales de la matriz se disponen alineados alrededor del contacto con los ocelos; ésto se ha interpretado debido a la existencia de flujo en el magma máfico con los ocelos graníticos incorporados antes del enfriamiento.

Se han distinguido tres etapas en la secuencia de cristalización de la matriz de la tonalita con ocelos, similares a las descritas por CASTRO *et al.* (1990 b) para la tonalita sin ocelos. En la primera etapa de baja densidad de nucleación se originarían núcleos de plagioclasa muy anortíticos, clinopiroxeno ahora transformado a anfíbol, y núcleos de anfíbol de la matriz.

A esta etapa le sigue una de alta densidad de nucleación como resultado del sobreenfriamiento sufrido por el magma máfico al ponerse en contacto con el magma félsico. En respuesta al sobreenfriamiento cristalizaron la mayoría de los componentes de la matriz (plagioclasa, anfíbol, apatito acicular y biotita).

En el estadio final se produjo un sobrecrecimiento de las plagioclasas de la matriz y fenocristales, y el crecimiento de cristales poiquiliticos de cuarzo y feldespato potásico.

La existencia de estas tres etapas en la secuencia de cristalización indica un episodio de sobreenfriamiento simplutónico de forma que la temperatura de cristalización es superior al solidus del magma tonalítico (CASTRO *et al.*, 1990 b).

Los ocelos poseen diferencias texturales según los tipos morfológicos que se consideran. Los ocelos redondeados y elipsoidales poseen una textura pegmatoides zonada, generalmente con un núcleo de cuarzo \pm biotita (clorita), y un borde de cuarzo + feldespato potásico. Sin embargo los ocelos lobulados e irregulares tienen una textura pegmatoides con tendencia hipidiomórfica sin zonado, constituida por cuarzo + feldespato potásico + biotita. Minerales accesorios son opacos y esfena.

COMPOSICION QUIMICA DE LAS ROCAS OCELARES

En la tabla 2 se relacionan los análisis químicos de elementos mayores y trazas de seis muestras de tonalita con distintos porcentajes de ocelos GE-38, GE-39, GE-40, GE-41, GE-42 y GE-43) y una muestra de un núcleo de una masa tonalítica sin ocelos (GE-19).

Los análisis fueron realizados por absorción atómica en el Departamento de Geología de la Universidad de Oregón.

Los análisis que se han representado en diagramas de variación con SiO₂ (Fig. 4) junto con otros análisis ya existentes de tonalita, roca híbrida y granito encajante de la zona de mezcla (CASTRO *et al.*, 1990 b). En este diagrama se observa como la tonalita con ocelos constituye un grupo intermedio entre la tonalita sin ocelo y las rocas híbridas existiendo un patrón de variación rectilíneo muy bueno entre ambos tipos de

	GE-38	GE-39	GE-40	GE-41	GE-42	GE-43	GE-19
SiO2	60,09	59,47	59,25	60,97	58,87	63,21	59,06
TiO2	1,10	1,00	1,00	0,99	1,16	0,71	0,98
Al2O3	17,09	16,60	15,72	17,59	17,42	15,95	16,85
Fe2O3	0,82	1,15	1,21	0,87	0,89	0,45	0,96
FeO	4,79	5,16	5,16	4,74	5,42	4,92	5,01
MnO	0,12	0,16	0,13	0,12	0,13	0,10	0,13
MgO	2,46	3,05	2,39	2,43	2,62	2,27	2,95
CaO	5,34	6,31	4,89	5,65	5,69	4,65	6,26
Na2O	4,38	4,52	6,95	3,91	4,22	3,88	4,10
K2O	1,85	1,70	1,57	1,53	2,02	2,35	1,81
H2O+	1,74	0,91	1,27	0,74	1,32	1,07	1,27
H2O-	0,33	0,51	0,24	0,18	0,22	0,20	0,25
P2O5	0,21	0,13	0,20	0,22	0,23	0,13	0,10
TOTAL	100,32	100,67	99,98	99,94	100,21	99,89	99,73
Ba	501	469	483	475	495	460	410
Co	14	21	17	12	18	16	16
Cr	153	117	107	132	109	86	88
Cu	10	6	11	8	8	11	13
Li	26	28	32	40	26	32	23
Ni	7,7	11,0	7,7	11,0	5,7	11,0	11
Rb	70	73	71	57	69	103	65
Sr	233	248	245	239	243	206	249
Zn	59	70	71	62	69	63	67
% Ocelos	18,5	3,2	21,6	11,0	5,8	24,8	----

TABLA 2. Análisis de elementos mayores y trazas de la tonalita con ocelos (GE-38, GE-39, GE-40, GE-41, GE-42, GE-43) y análisis de una tonalita sin ocelos del núcleo de una masa (GE-19). Se incluye el porcentaje de ocelos de cada muestra.

rocas. Hay que resaltar también como la muestra GE-43 posee una composición parecida a la del ejemplo GE-29 (CASTRO *et al.*, 1990 b), la cual es una roca híbrida homogénea con 46 % de participación de magma félsico, calculado a partir del test de mezcla según LANGMUIR *et al.* (1978) y FOURCADE & ALLEGRE (1981) (DE LA ROSA & CASTRO, 1990 b, CASTRO *et al.*, 1990 b). Esto sugiere que las tonalitas ocelares de las zonas de interacción magmática pueden ser híbridas.

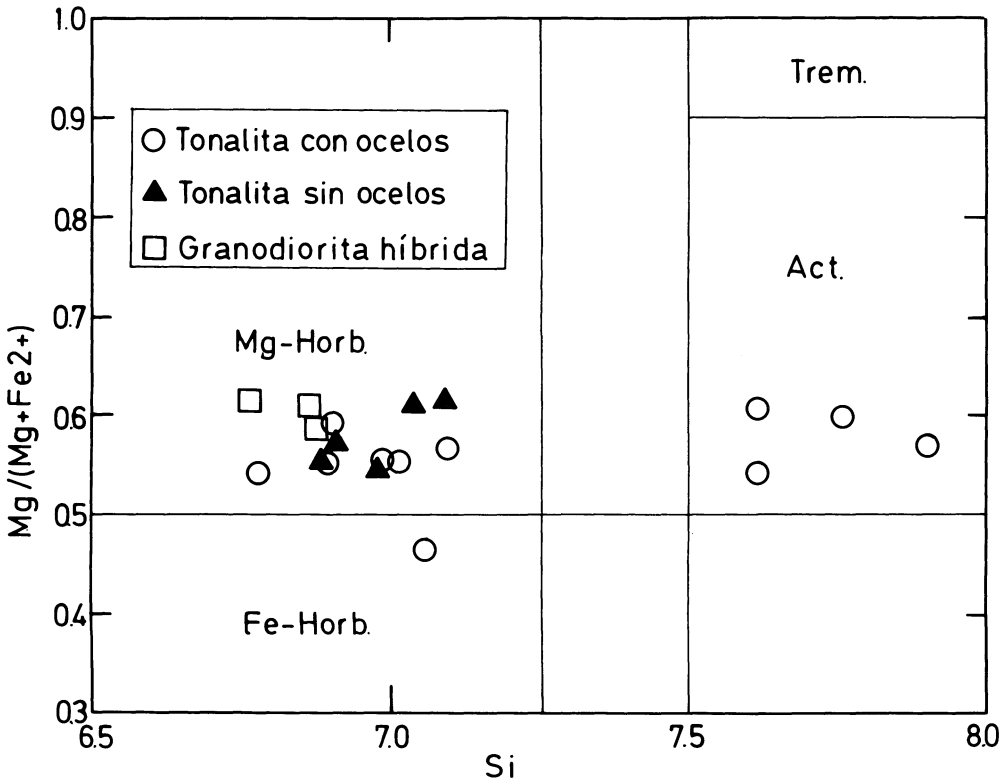


Fig. 4. Diagramas de variación con la sílice de los distintos tipos de rocas que afloran en la zona de interacción del Macizo de Gerena (Sevilla). Análisis de la tonalita con ocelos en este trabajo. Otros análisis en Castro *et al* (1990b).

COMPARACION ENTRE LAS TONALITAS CON OCELOS Y SIN OCELOS

Química mineral

Anfíbol y biotita de la matriz de la tonalita con ocelos y biotita de los ocelos han sido analizados con una microsonda JEOL JCA733 bajo unas condiciones de intensidad de corriente de 20 nA y voltaje de aceleración de 15 kv. Estos análisis han sido utilizados para compararlos con otros de anfíbol y biotita de las tonalitas sin ocelos de la zona de interacción del Macizo de Gerena realizados por CASTRO *et al.* (1990 b) bajo las mismas condiciones.

Anfíbol:

En la tabla 3 se relacionan análisis representativos de anfíbol de la matriz de la tonalita con ocelos con sus respectivas fórmulas estructurales calculadas según los criterios cristaloquímicos descritos por ROBINSON *et al.* (1982). Fe_3+ fue calculado usando la ecuación de DROOP (1987) para anfíboles asumiendo un total de 13 cationes, excluyendo Ca, Na y K.

Los anfíboles se clasifican como Mg-hornblendas y actinolitas en el diagrama de LEAKE (1978) (Fig. 5) con contenidos en Si entre 6,779 y 7,902.

Se observa como las hornblendas de la matriz de la tonalita con ocelos son distintas a las hornblendas de la tonalita y roca híbrida, siendo los contenidos en Al VI, Ti, Mn, Ca y □A mayores y en Mg ($Mg + Fe_2+$) menores.

La menores relaciones de Mg ($Mg + Fe_2+$) de las hornblendas de la matriz de la tonalita con ocelos en comparación con las hornblendas de la tonalita sin ocelos y roca híbrida se han interpretado como debidas a una transferencia de volátiles del magma máfico al magma félsico antes del enfriamiento, originándose en consecuencia una disminución de la fO_2 en el magma tonalítico, de forma parecida a lo sugerido para los

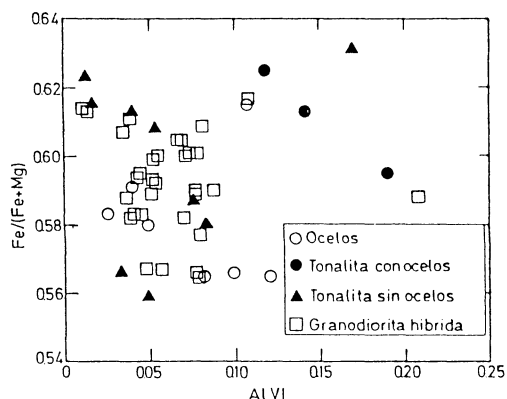


Fig. 5. Diagrama de clasificación de anfíbol (Leake 1978) de los anfíboles de la zona de interacción del Macizo de Gerena.

anfíboles del borde frío de los diques sim-plutónicos (CASTRO *et al.*, 1990 b).

Biotita

Los análisis de biotitas de la matriz de la tonalita con ocelos y biotitas de los ocelos están representados en la tabla 4 junto con sus respectivas fórmulas estructurales. Los análisis se encuentran en el campo de la biotita dentro del diagrama de clasificación de DEER *et al.* (1966).

Aunque las biotitas de la matriz de la tonalita con ocelos y biotitas de los ocelos son muy parecidas a las biotitas analizadas de la tonalita sin ocelos, roca híbrida y granitoides encajantes por CASTRO *et al.* (1990 b), en el diagrama $Fe/(Fe + Mg)$ vs. AlVI (Fig. 6) se observa como las biotitas de los ocelos poseen contenidos en $Fe/(Fe + Mg)$ y AlVI diferentes a las biotitas de la matriz de la tonalita con ocelos y parecidos a las biotitas del granito encajante.

Química de roca total

Con el fin de conocer las diferencias existentes en el contenido de elementos mayores de la matriz de la tonalita con ocelos y la tonalita sin ocelos, se ha calculado la composición química hipotética que tendría

	1	7	9	11	13	16	18	30
SiO ₂	45,99	45,09	47,39	53,31	45,72	45,51	46,49	50,46
TiO ₂	1,00	1,87	1,15	0,13	1,66	2,10	1,33	0,34
Al ₂ O ₃	5,77	7,73	5,52	0,85	7,13	5,93	5,85	2,97
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,03	0,01	0,04	0,04	0,06	0,00
FeO	13,24	13,88	13,72	16,96	14,17	18,49	14,49	16,63
Fe ₂ O ₃	8,52	6,62	6,61	----	5,07	0,48	5,35	1,53
FeOt	20,90	19,84	19,67	16,96	18,73	18,92	19,30	18,00
MnO	0,64	0,57	0,49	0,27	0,47	0,51	0,5	0,38
NiO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,01	0,01
MgO	9,38	9,25	10,15	12,65	9,88	9,03	10,15	11,10
CaO	10,09	10,26	10,68	12,81	10,50	11,66	10,85	11,72
Na ₂ O	1,66	1,60	0,98	0,11	1,59	1,15	1,34	0,54
K ₂ O	0,46	0,65	0,54	0,02	0,64	0,57	0,54	0,18
TOTAL	96,45	97,52	97,26	97,13	96,86	95,21	96,97	95,86

Fórmula Estructural (O-23)

Si	6,988	6,779	7,099	7,902	6,896	7,059	7,017	7,617
Al IV	1,012	1,221	0,901	0,098	1,104	0,941	0,983	0,383
Al VI	0,023	0,149	0,074	0,051	0,165	0,142	0,058	0,145
Ti	0,115	0,211	0,129	0,015	0,188	0,245	0,151	0,038
Cr ³⁺	0,000	0,000	0,004	0,002	0,004	0,004	0,007	0,000
Fe ³⁺	0,982	0,753	0,749	0,000	0,577	0,056	0,610	0,173
Fe ²⁺	1,696	1,754	1,728	2,103	1,793	2,398	1,835	2,100
Mn	0,082	0,072	0,063	0,034	0,060	0,068	0,065	0,049
Ni	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,001	0,001
Mg	2,125	2,073	2,266	2,795	2,220	2,087	2,283	2,496
Suma C	5,022	5,012	5,012	5,000	5,007	5,007	5,009	5,002
R ²⁺	0,022	0,012	0,012	0,000	0,007	0,007	0,009	0,002
Ca	1,643	1,652	1,714	2,034	1,697	1,888	1,755	1,896
Na (M ₄)	0,335	0,335	0,274	0,031	0,296	0,105	0,236	0,102
Suma B	2,000	2,000	2,000	2,065	2,000	2,000	2,000	2,000
Na (A)	0,066	0,132	0,011	0,000	0,168	0,241	0,155	0,057
K	0,089	0,125	0,103	0,003	0,123	0,112	0,104	0,035
Suma A	0,155	0,257	0,114	0,003	0,292	0,353	0,260	0,092
TOTAL	15,155	15,257	15,114	15,069	15,292	15,353	15,260	15,092
Mg	0,556	0,542	0,567	0,571	0,553	0,465	0,554	0,543

TABLA 3. Análisis representativos y fórmula estructural de anfíboles de la matriz de la tonalita con ocelos. Fe³⁺ fue calculado usando la ecuación de Droop (1987) para anfíboles cálcicos asumiendo un total de 15 cationes, excluyendo Ca, Na y K.

	3	6	20	21	22	23	26	28	29
SiO ₂	36,06	35,23	36,62	36,21	36,20	36,81	35,95	35,61	35,82
TiO ₂	5,30	4,82	4,93	4,85	4,89	4,20	5,08	4,62	4,93
Al ₂ O ₃	13,94	13,76	13,33	13,52	13,81	13,91	13,28	13,44	13,30
FeO _t	22,66	23,28	21,36	21,57	21,60	23,08	22,50	22,52	22,67
Cr ₂ O ₃	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,05	0,03	0,05	0,00
MnO	0,17	0,27	0,13	0,16	0,23	0,22	0,15	0,16	0,23
NiO	0,00	0,07	0,02	0,4	0,00	0,00	0,4	0,04	0,00
MgO	8,02	7,83	9,23	9,28	8,24	9,97	9,01	9,14	8,81
CaO	0,01	0,08	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,01
Na ₂ O	0,05	0,04	0,17	0,11	0,11	0,25	0,10	0,08	0,07
K ₂ O	9,42	9,16	9,55	9,25	9,60	8,80	9,26	9,33	9,39
TOTAL	95,61	94,55	95,69	95,00	94,72	97,32	95,40	94,98	95,23

Fórmula Estructural (O-24)									
Si	5,593	5,559	5,640	5,623	5,649	5,592	5,590	5,571	5,592
Al IV	2,407	2,442	2,360	2,337	2,351	2,408	2,410	2,429	2,408
Al VI	0,142	0,118	0,121	0,099	0,190	0,082	0,026	0,049	0,040
Ti	0,618	0,572	0,572	0,566	0,573	0,480	0,594	0,543	0,578
Fe ²⁺	2,940	3,072	2,752	2,801	2,819	2,933	2,926	2,947	2,960
Cr	0,000	0,003	0,002	0,001	0,002	0,006	0,003	0,006	0,000
Mn	0,022	0,036	0,017	0,021	0,030	0,028	0,020	0,021	0,030
Ni	0,000	0,005	0,001	0,003	0,000	0,000	0,003	0,003	0,000
Mg	1,853	1,840	2,119	2,148	1,916	2,257	2,089	2,130	2,050
Y	5,574	5,645	5,583	5,637	5,529	5,786	5,661	5,699	5,659
Ca	0,001	0,013	0,000	0,000	0,006	0,005	0,000	0,000	0,001
Na	0,014	0,012	0,051	0,034	0,033	0,075	0,029	0,024	0,021
K	1,865	1,844	1,876	1,832	1,911	1,705	1,838	1,861	1,870
X	1,880	1,869	1,927	1,867	1,949	1,784	1,867	1,885	1,893
TOTAL	15,454	15,514	15,510	15,504	15,478	15,570	15,528	15,584	15,551
*Fe	0,613	0,625	0,565	0,566	0,595	0,565	0,583	0,580	0,591

TABLA 4. Análisis representativos y fórmula estructural de biotitas de la matriz de la tonalita con ocelos y biotitas de los ocelos.

la matriz de dos muestras de tonalita con < 15 % y > 15 % de ocelos (GE-42 y GE-43) a partir de datos modales y química mineral. Los resultados se encuentran en la Tabla 5, donde se observa una gran similitud entre la composición de la matriz de la

muestra GE-42 y GE-43 (Tabla 5), y la tonalita sin ocelos GE-19 (Tabla 2), siendo los coeficientes de correlación (R) obtenidos de 0.98 y 0.97 respectivamente sin considerar SiO₂ y Al₂O₃. En la Tabla 5 también se incluye la composición química calculada de

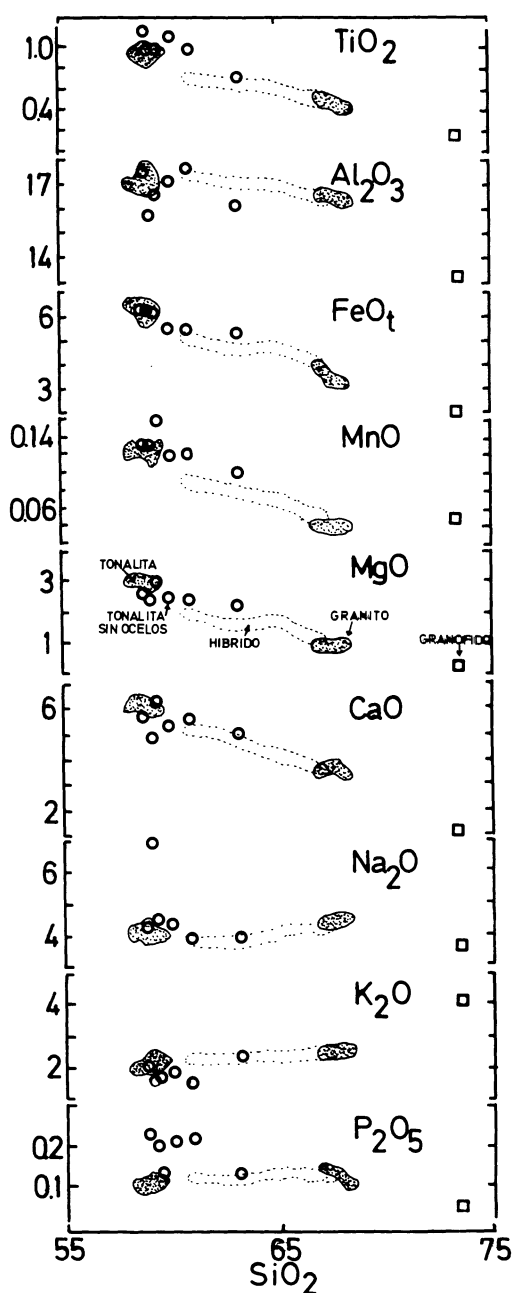


Fig. 6. Diagrama $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ vs AIVI de las biotitas de la zona de interacción del Macizo de Gerena.

los ocelos, la cual, para la muestra GE-43 es muy parecida a la del granito granofídico fuera de la zona de mezcla de Gerena.

Con el objeto de conocer las diferencias existentes en el contenido de elementos trazas de la tonalita ocelares y tonalita sin ocelos se han representado en un diagrama «araña» los rangos y medias de los contenidos de elementos traza de las tonalita con ocelos ($>$ y $<$ 15 % de ocelos) y tonalita sin ocelos (Fig. 7). Todos los valores han sido normalizados a los contenidos medios de la tonalita sin ocelos. Los rangos de los contenidos en elementos trazas de la tonalita sin ocelos y con ocelos poseen similitudes, sin embargo existen diferencias en ciertos elementos, por ejemplo la tonalita con ocelos posee contenidos mayores en elementos refractarios (Zn y Cr) y menores en incompatibles (Rb y Sr) que las tonalitas sin ocelos (Fig. 7). Esto sugiere que la matriz de la tonalita con ocelos es más primitiva que las tonalitas sin ocelos, pues aun considerando los ocelos en los análisis de roca total existe un empobrecimiento en incompatibles que será aún mayor si pudiera descontarse los ocelos del análisis.

DISCUSION

La mayoría de las hipótesis existentes que explican la petrógenesis de las rocas ocelares aluden a procesos de inmiscibilidad que ocurren en un magma, a partir del cual se origina por un lado una matriz máfica generalmente de tamaño de grano fino que incluye a cuerpos félsicos subredondeados (ROEDDER, 1979). En principio la tonalita con ocelos que aflora en las zonas magmática del BSNS podría ser interpretada en este sentido, sobre todo aquellos ejemplos con baja proporción de ocelos, que poseen composición química muy parecida a las tonalitas sin ocelos. Sin embargo el estudio de los datos de campo, petrografía, química mineral y total aportadas en este trabajo, muestra como las tonalitas con mayor proporción en

	TONALITA	GRANOFIDO	GE-42 (5,8% de ocelos)		GE-43 (24,8% de ocelos)	
			MATRIZ	OCELO	MATRIZ	OCELO
SiO ₂	59,06	73,52	56,93	63,81	58,46	77,64
TiO ₂	0,98	0,18	0,52	2,62	0,74	0,61
Al ₂ O ₃	16,85	13,27	16,82	19,18	16,47	14,37
FeO _t	5,87	2,08	6,60	0,05	7,31	-----
MnO	0,13	0,05	0,15	-----	0,15	-----
MgO	2,95	0,28	3,26	-----	3,49	-----
CaO	6,26	1,16	6,20	-----	5,73	1,36
Na ₂ O	4,10	3,64	5,21	-----	4,83	0,98
K ₂ O	1,81	4,15	0,98	13,34	1,53	4,83
P ₂ O ₅	0,10	0,05	0,22	-----	0,09	-----

TABLA 5. Composición de elementos mayores de la matriz tonalítica y ocelos de las muestras GE-42 (< 15 % ocelos) y GE-43 (> 15 % ocelos) calculados a partir de datos de moda y análisis con microsonda.

ocelos poseen características intermedias entre la tonalita sin ocelos y la roca híbrida, existiendo muestras de tonalita ocelar con composiciones muy parecidas a las de la roca híbrida homogénea, por lo que en su génesis deberían de haberse actuado procesos de mezcla magmática por incorporación de líquido granítico al magma máfico. De forma similar BUSEL (1985, 1988) explica este tipo de rocas en la Super Unidad del Pisco en el Batolito Costero del Perú.

DE LA ROSA & CASTRO (1990 b) proponen en el modelo de mezcla de la zona de interacción del Macizo de Gerena que las tonalitas con ocelos se originaron en el primer estadio de interacción entre el magma félsico y máfico basados en el tamaño de grano fino que poseía la matriz de esta roca en comparación con aquel de la tonalita sin ocelos. Con los datos de elementos trazas y química mineral de la tonalita con ocelos aportados en este trabajo se confirma esta hipótesis, asumiendo que durante la interacción magmática existió posiblemente una diferenciación del magma máfico.

Para la zona de mezcla del Macizo de Gerena han sido calculadas las condiciones de flujo convectivo a partir de la fórmula de RAYLEIGH (1916) y parámetros físicos de SPARKS *et al.* (1977) tomando unas dimensiones mínimas para la zona de mezcla

de 30 metros. El valor obtenido es de $R = 1,65 \cdot 10^{10}$, muy superior al número de RAYLEIGH para originar la convección (1.700). Asimismo la velocidad de las células convectivas fue de 1.400 metros/día si el flujo fuera laminar, aunque esto en nuestro caso parece ser poco probable dado que algunos autores (cf. SHAW 1965) predicen un flujo turbulento para magmas con un número de Rayleigh mayor que 10^4 .

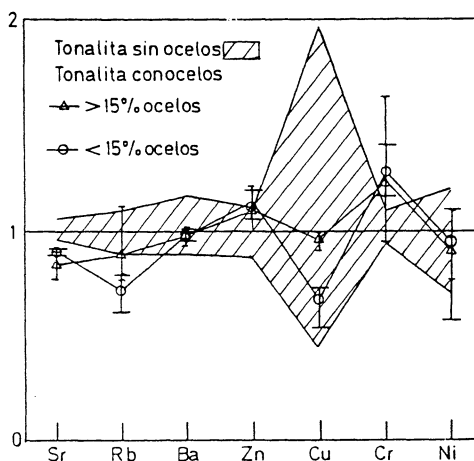


Fig. 7. Diagrama «araña» del contenido en elementos traza de la tonalita con ocelos y tonalita sin ocelos normalizado con la media de las tonalitas sin ocelos de la zona de interacción del Macizo de Gerena.

El posible flujo turbulento, junto con el sobrecalentamiento que sufre el magma félsico cuando se pusieron en contacto por primera vez ambos magmas favorecieron la incorporación de líquido félsico sobrecalentado como «gotas» (ocelos) al interior del magma máfico. Una vez incorporado el líquido félsico sobrecalentado en el magma máfico, éste sufrió un sobreenfriamiento debido al emplazamiento subvolcánico y a la diferencia de temperatura con el magma félsico, originando de esta manera la tonalita ocelar. Antes de la cristalización completa del magma máfico con las gotas de líquido granítico, éstas sufrieron una deformación por flujo del magma máfico: existen varias observaciones que confirman éste hecho tales como la distribución orientada de los cristales de plagioclasa y anfíbol alrededor de los ocelos y la disposición de ocelos elipsoidales y enclaves cogenéticos paralelos al contacto de un dique simplutónico.

El flujo en el interior del magma máfico con las gotas de magma granítico y la diferencia de viscosidad entre las gotas de magma granítico y el magma máfico encajante determinan la forma de los ocelos. Siendo μ_T la viscosidad del magma tonalítico encajante y μ_G la viscosidad del líquido granítico en las gotas, si $\mu_T/\mu_G < 1$ se originarán ocelos redondeados que por acción del flujo del magma tonalítico pueden modificarse a formas elipsoidales. Si $\mu_T/\mu_G = 1$ los ocelos que se formarán son lobulados e irregulares. Y si $\mu_T/\mu_G > 1$ los ocelos poseerán formas lobuladas con contactos de tipo convexo hacia el interior del ocelo.

La evolución del sistema hacia el equilibrio térmico implica que en los estadios posteriores a la primera interacción magmá-

tica, la diferencia de temperatura entre el magma máfico y félsico sea menor, y el régimen de flujo en el magma félsico se haga menos turbulento (mayor porcentaje de magma cristalizado y aumento de la viscosidad); en estas condiciones ya no es propicia la incorporación de líquido granítico sobrecalentado al magma máfico.

Rocas máficas con ocelos han sido descritas en zonas de mezcla de ambientes subvolcánicos, BSNS (DE LA ROSA & CASTRO, 1990 b; CASTRO *et al.*, 1990 b); Super Unidad del Puscao del Batolito Costero del Perú (BUSSELL, 1985, 1988)). Aunque no hay una razón concreta para explicar el porqué de este hecho creemos que el enfriamiento rápido del magma máfico con los ocelos graníticos ha permitido que se haya preservado la textura ocelar. En ambientes plutónicos más profundos, el enfriamiento lento de la tonalita favorecería la mezcla completa de ambos líquidos desapareciendo la textura ocelar. Este mecanismo puede contribuir a la hibridación de magmas básicos a mayor escala.

AGRADECIMIENTOS

Los análisis de microsonda fueron realizados por los autores en la Universidad de St. Andrews (Escocia). Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto de Investigación CICYT PS87-0125, Junta de Andalucía (Plan Andaluz de Investigación), y Convenio Vicerrectorado de los Centros Universitarios de Huelva y la Asociación de Industrias Químicas y Básicas de Huelva.

BIBLIOGRAFIA

- ANGUS, N. S. (1962). Ocellar hybrids from the Tyro-ne igneous series, Ireland. *Geol. Mag.*, 99. 9-27.
- BUSSELL, M. A. (1985). The centred complex of the Tio Huaura: a study of magma mixing and differentiation in high-level chambers. In Pitcher W. S., Atherton, M. P., Cobbing, E. J., Beckinsale, R. D. (eds.). *Magmatism at a plate edge: The Peruvian Andes: 128-155*. Glasgow: Blackie.
- BUSSELL (1988). Structure and petrogenesis of a mixed-magma ring dyke in the Peruvian Coastal Batholith: eruptions from a zoned magma chamber. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, 79: 87-104.
- CANTAGREL, J. M., DIDIER, J., GOURGAUD, A. (1984). Magma mixing: origin of intermediate rock and «enclaves» from volcanism to plutonism. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 35. 63-76.
- CASTRO, A., MORENO-VENTAS, I., DE LA ROSA, J. D. (1990 a). Microgranular enclaves as indicators of hybridization processes in granitoid rocks, Hercynian Belt, Spain. *Geological Journal* (in press).
- CASTRO, A., DE LA ROSA, J. D., STEPHENS, W. E. (1990 b). Petrology of a magma mixing zone: The Gerena massif, Hercynian Belt, Spain. *Contribution Mineral Petrol* (in press).
- DEER, W. A., HOWIE, R. A., ZUSSMAN, J. (1966). An introduction to the rock forming minerals. *Longman*. 528 pp.
- DE LA ROSA, J. D., CASTRO, A. (1990 a). The ultrabasic rocks of the Castillo de las Guardas massif (Seville). *Geogaceta* 7. 47-49.
- DE LA ROSA, J. D., CASTRO, A. (1990 b). Estudio petrológico de una zona de interacción magmática al sur del Macizo de Gerena (Zona Surportuguesa, Sevilla): Modelo y Mezcla. *Boletín Geológico y Minero* 101. 315-332.
- DROOP, G. T. R. (1987). A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine* 51. 431-435.
- FOURCADE, S., ALLEGRE, C. J. (1981). Trace elements behavior in granite genesis: A case study the calc-alkaline plutonic from the Querigut Complex (Pyrénées, France). *Contrib. Mineral Petrol.*, 76. 177-195.
- LANGMUIR, C. H., VOCKE, R. D. Jr., HANSON, G. N. (1978). A general mixing equation with applications to Icelandic basalts. *Earth and Planetary Science Letters* 37. 280-392.
- LEAKE, B. E. (1978). Nomenclature of amphibolites. *Canadian Mineralogist* 16. 501-520.
- NIXON, G. T., PEARCE, T. H. (1987). Laser-interferometry study of oscillatory in plagioclase: the record of magma mixing and phenocryst recycling in calc-alkaline magma chambers, Iztaccihuatl volcano, México. *American Mineralogist* 72. 1.144-1.162.
- PHILLIPS, E. R. (1963). Mafic rocks from the New England Batholith, New South Wales. *Geol. Mag.* 105: 160-165.
- PHILPOTTS, A. R. (1976). Silicate liquid immiscibility: its probable extent and petrogenetic significance. *American Journal of Science* 276. 1.147-1.177.
- RAYLEIGH, J. W. S. (1916). On convection currents in a horizontal layer of fluid when the higher temperature is on the under side. *Phil. Mag.* 32. 529-546.
- ROEDDER, E. (1979). Silicate liquid immiscibility in magmas. In *The Evolution of the Igneous Rocks: Fiftieth Anniversary Perspectives*. Yoder H. S. ed.. 15-57.
- SHAW, D. M. (1965). Comments on viscosity, crustal settling and convection in granitic magmas. *Am. J. Sci.* 263. 120-152.
- SPARKS, R. S. J., SIGURDSSON, H., WILSON, L. (1977). Magma mixing a mechanism for triggering acid explosive eruptions. *Nature* 267. 315-318.
- VERNON, R. H. (1983). Restite, xenoliths, and microgranitoid enclaves in granites. *Journal and Proceedings, Royal Society of New South Wales* 116. 77-103.

Recibido, 29-11-90

Aceptado, 10-II-91